نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۱، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۴۰۰، ص ۲۴۶-۲۳۱

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 11, No. 2, Fall- Winter 2021, p. 231-246

مقاله علمی-پژوهشی

مطالعه عددی حرکت گندم در داخل سیکلون جداکننده استرماند با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

ساجد نعیمی دیزجیکان[۱]، غلامحسین شاهقلی[۲*]، عادل رضوانی وند فنائی[۳]، وحید رستم پور[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۲۳

چکیده

سیکلون‌ها از جمله جداکننده‌های گریز از مرکز هستند که به‌دلیل سادگی و هزینه‌های ساخت و نگهداری نسبتاً پایین مورد توجه قرار گرفته‌اند. بازده جمع‌آوری ذرات و افت فشار دو پارامتر کلیدی در عملکرد سیکلون‌ها می‌باشند. دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) یک ابزار قدرتمند برای پیش‌بینی رفتار جریان در طیف گسترده‌ای از طراحی و شرایط عملیاتی است که با حل عددی معادلات ناویر استوکس درک بهتری از حل عددی آشفتگی می‌دهد. در این مطالعه از یک سیکلون استرماند بازده بالا برای مطالعه رفتار گندم در داخل سیکلون استفاده گردید. برای رسم شبکه مسئله از نرم‌افزار گمبیت و برای حل معادلات بقا از نرم‌افزار کد تجاری انسیس فلوئنت ۱۵ بهره گرفته شد. با توجه به عدد ماخ زیر ۰/۳ جریان، حلگر بر پایه فشار و از مدل SSTk-ω برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان استفاده شد. با فرض رقیق بودن جریان گندم در داخل جریان هوا (کسر حجمی زیر ۱۲٪) فاز مجزا با ردیابی تعداد زیادی از ذرات از طریق میدان جریان محاسبه گردید. با توجه به اهمیت بالای میدان‌های فشار و سرعت و تاثیر مستقیم بر روی بازده عملکردی سیکلون، در سرعت‌های ورودی $m\ s^{-1}$ ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ و نرخ جرمی جریان $kg\ s^{-1}$ ۰/۰۸ پارامترهای فشار استاتیک، فشار کل، سرعت محوری، سرعت مماسی، شدت آشفتگی و سایش با همدیگر مقایسه شد. همچنین بازده جمع‌آوری برای سرعت‌های فوق به‌دست آمد. نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن تمامی شرایط سرعت ورودی $m\ s^{-1}$ ۱۶ بهترین عملکرد را دارا بود.

واژه‌های کلیدی: استرماند، افت فشار، دینامیک سیالات محاسباتی، سیکلون

مقدمه

سیکلون‌ها از جمله تجهیزات مورد استفاده در سطح وسیع هستند که برای جداسازی ذرات جامد از فاز سیال مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به سادگی ساخت، هزینه‌های اجرا و نگهداری پایین و شرایط کاری سخت و در دماهای بالا، روز به روز علاقه‌مندی برای استفاده از سیکلون‌ها در حال افزایش است. نیروی گریز از مرکز ایجاد شده توسط جریان چرخشی در یک سیکلون باعث حرکت ذرات موجود به سمت دیواره و جدا شدن از فاز سیال می‌شود. ذرات درشت‌تر توسط نیروی گریز از مرکز قوی‌تر حرکت کرده و در خروجی پایینی در کف سیکلون جمع می‌شوند. ذرات ریزتر در جریان سیال باقی مانده و از طریق گردابه‌یاب از خروجی بالای سیکلون خارج می‌شوند. مهندسان عموماً به دو پارامتر بازده جمع‌آوری ذرات و افت فشار علاقه‌مند هستند تا یک ارزیابی کامل را از طراحی و عملکرد یک سیکلون انجام دهند. پیش‌بینی دقیق افت فشار در داخل سیکلون بسیار مهم است، زیرا به‌طور مستقیم با هزینه‌های عملیاتی در ارتباط است. شکل ۱ شماتیکی از یک سیکلون معمول را به همراه بخش‌های مهم آن نشان می‌دهد.

دینامیک سیالات محاسباتی

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD[5]) یک ابزار متنوع برای پیش‌بینی رفتار جریان در طیف گسترده‌ای از طراحی و شرایط عملیاتی است. حل عددی معادلات ناویر استوکس اساس تمام تکنیک‌های CFD می‌باشد که نتیجه پیشرفت سریع کامپیوترها و درک بهتر از حل عددی آشفتگی است. با توسعه به این پیشرفت سریع CFD، استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی برای پیش‌بینی عملکرد سیکلون توجه زیادی را به خود جلب کرده است. برای جریان آشفته در سیکلون‌ها، کلید موفقیت CFD توصیف دقیق رفتار آشفتگی جریان است.

انسیس فلوئنت یک برنامه تجاری استفاده‌کننده از رویکرد حجم محدود CFD است که برای انجام محاسبات کوپل[6] یا جداگانه[7] (به

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی
۲- دانشیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی
۳- استادیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه
۴- استادیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه
(*- نویسنده مسئول: (Email: gshahgoli@yahoo.com
DOI: 10.22067/jam.v11i2.79613

5- Computational Fluid Dynamics
6- Coupled
7- Segregated

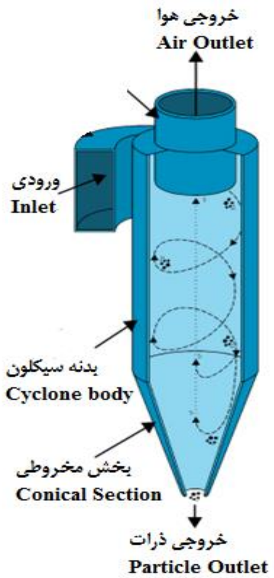
کمک معادلات بقای جرم[1]، بقای مومنتوم[2] و بقای انرژی[3] استفاده می‌شود. این به صورت ایده‌آل برای جریان‌های غیر متراکم و نسبتاً قابل تراکم مناسب است. بقای جرم، مومنتوم و انرژی در جریان‌های سیال در عبارت‌های معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی بیان می‌شود که راه‌حل را با روش‌های تحلیلی ارائه می‌دهد. حل این معادلات با ظهور ایستگاه‌های کاری قدرتمند امکان‌پذیر شده و راه‌های ساده‌ای برای محاسبه میدان‌های جریان پیچیده با سهولت نسبی فراهم شده است. برای مدل‌سازی جریان چرخشی در سیکلون، چند نوع از مدل‌های آشفتگی در انسیس فلوئنت وجود دارد (Ansys Fluent theory guide, 2013).

مطالعات در مورد سیکلون‌ها با افزایش قابلیت کامپیوترها سرعت بیشتری به خود گرفته است. مطالعات انجام گرفته در زمینه تاثیر ابعاد سیکلون بر روی بازده جمع‌آوری، افت فشار، ویژگی‌های جریان‌های داخلی و همچنین بحث‌های مربوط به سایش و خوردگی انجام گرفته است و به بحث مربوط به تاثیر ویژگی‌های ورودی بر روی نیروهای گریز از مرکز کمتر پرداخته شده است. یکی از اولین مطالعات در این حوزه شامل مطالعه‌ای با موضوع مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی و تجربی عملکرد یک نمونه سیکلون می‌باشد (Griffiths and Boysan, 1996). پژوهش دیگری در زمینه مطالعه دینامیک سیالات محاسباتی بر روی پیش‌بینی بازده جمع‌آوری سیکلون انجام پذیرفته است (Gimbun *et al.*, 2005a). در ادامه تاثیر دما و سرعت ورودی بر افت فشار داخل سیکلون در قالب یک مطالعه CFD مورد بررسی قرار گرفته است (Gimbun *et al.*, 2005b). بهینه‌سازی هندسه سیکلون جداکننده برای کمینه کردن افت فشار با استفاده از مدل‌های ریاضیاتی و شبیه‌سازی‌ها مطالعه شده است (Elsayed and Lacor, 2010). همچنین در مورد انتخاب مدل اغتشاشی مناسب مطالعات زیادی انجام گرفته شده و مشخص شده است که انتخاب مدل آشفتگی مناسب برای شبیه‌سازی جریان‌های چرخشی پیچیده در داخل سیکلون‌ها کاملاً ضروری است. تفسیر جریان سیال در داخل سیکلون با استفاده از سه مدل آشفتگی مختلف مطالعه شده و مدل RSM به‌عنوان مدل مناسب پیشنهاد شده است (Hoekstra, 1999). در مطالعه دیگری، سه مدل آشفته SST، RSM و k-ε برای شبیه‌سازی جریان هوای داخل سیکلون استفاده شد و مشخص شد که مدل آشفته SST به‌صورت قابل‌توجهی بهتر از روش‌های RSM و k-ε می‌باشد (Ahmadi and Nowakowski, 2016). موضوع مهم دیگر در شبیه‌سازی عددی الگوهای جریان در سیکلون‌ها در نظر گرفتن اثرات هندسی است که توسط محققین مختلف انجام شده است. در یکی از مطالعات، تعدادی از پارامترهای هندسی که عملکرد سیکلون را تحت تاثیر قرار می‌دهد مورد مطالعه قرار گرفت (Alexander, 1949). مطالعه بر روی تاثیر قطر نوک مخروط سیکلون بر روی افت فشار و عملکرد سیکلون‌ها انجام شد و نتیجه گرفته شد زمانی‌که قطر نوک مخروط کاهش می‌یابد، افت فشار کل و عملکرد سیکلون افزایش می‌یابد (Gimbun *et al.*, 2005c). همچنین در مطالعهٔ دیگری عملکرد سیکلون‌های با یک ورودی با سیکلون‌هایی با دو ورودی مقایسه شد و مشخص گردید که سیکلون با دو ورودی نسبت به سیکلون یک ورودی به دلیل افزایش بازده، عملکرد بهتری دارد (Zhao *et al.*, 2006). در پژوهش دیگری، یک بررسی تجربی برای مطالعه اثرات طول سیکلون بر روی عملکرد سیکلون انجام شده است. نتایج نشان داد که با افزایش طول سیکلون (تا ۵/۵ برابر قطر سیکلون)، عملکرد سیکلون به‌صورت چشم‌گیری افزایش یافته و تحت تاثیر این طول، بازده به‌صورت چشم‌گیری کاهش می‌یابد (Hoffmann *et al.*, 2001). یک شبیه‌سازی CFD سیکلون با تمرکز بر تاثیر ارتفاع سیکلون بر روی دامنه جریان انجام گرفت و نشان داده شد که با افزایش ارتفاع، سرعت مماسی کاهش می‌یابد. مدل‌سازی انتقال مواد در جداکننده‌های سیکلونی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی در یک پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است (Rezvanivandefanayi *et al.*, 2013a). بررسی تاثیر نرخ سیالیت جرمی، در میدان های سرعتی، افت فشار و اصطکاک دیواره جداکننده‌های سیکلونی با استفاده از CFD نیز در سه مطالعه مختلف مورد بررسی قرار گرفته است (Rezvanivandefanayi *et al.*, 2013b, c, d). همچنین یک مطالعه CFD در مورد اثرات قطر ذرات خوراک بر روی افت فشار در داخل یک سیکلون جداکننده انجام شده است (Rezvanivandefanayi and Nikbakht, 2015). همچنین در زمینه سایر کارهای مرتبط با کاربرد CFD در کشاورزی، مطالعه ترموکمپرسور بخار به‌منظور کاهش مصرف انرژی در خط تولید شکر به روش دینامیک سیالات محاسباتی مورد مطالعه قرار گرفته است (Rezvanivandefanayi *et al.*, 2019). مطالعه دیگری در مورد مقایسه بین خروجی پیش‌بینی شده از کالکتور خورشیدی صفحه تخت و نتایج تجربی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و شبکه عصبی مصنوعی انجام شده است (Naddi *et al.*, 2017).

در کارهای ذکر شده در بالا که بر روی شبیه‌سازی CFD جریان داخلی سیکلون انجام شده‌اند، تمرکز اصلی بر پارامترهای هندسی مختلف مانند ابعاد ورودی، زوایای ورودی، ارتفاع سیکلون، قطر بخش استوانه‌ای، قطر بخش خارجی، وضعیت‌های مختلف قرارگیری گردابه‌یاب و قطر نوک مخروط بوده است. همچنین مطالعات کمی بر روی تاثیر پارامترهای جریان ورودی بر روی فعل و انفعالات اتفاق افتاده در داخل سیکلون، بحث افت فشار و همچنین شدت آشفتگی و سایش داخل سیکلون انجام شده است. بنابراین هدف از این تحقیق به‌دست آوردن پارامترهای جریان ورودی مناسب به هنگام انتقال

1- Conservation of mass
2- Conservation of momentum
3- Conservation of energy

گندم در داخل سیکلون و همچنین بـه‌دسـت آوردن بهتـرین سـرعت ورودی، سایش در هر کدام از حالت‌ها و مشاهده جریـان‌هـای داخلـی سیکلون در سرعت‌های مختلف ورودی مواد به داخل سیکلون اسـت.



شکل ۱– شماتیکی از یک سیکلون
Fig.1. A Schematic of a Cyclone

مواد و روش‌ها

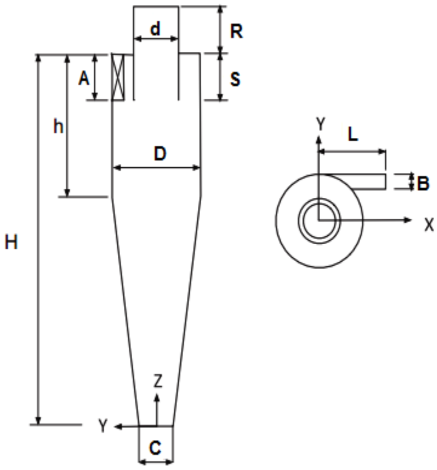
با توجه به انجام تست‌های اولیه تجربی و مشاهده جریان‌یابی مواد، نرخ جرمی $kg.s^{-1}$ ۰/۰۸ به‌عنوان نرخ جرمی مواد جامد مورد استفاده انتخاب شد. ۶ سطح سرعت ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸ و $m\ s^{-1}$ ۲۰ برای درک هرچه بیشتر تاثیر سرعت ورودی بر عملکرد سیکلون به‌عنوان سطوح تست انتخاب شدند. اندازه‌گیری‌ها توسط یک سرعت‌سنج هوای سیم داغ (مدل TSI -8465) با رزولوشن $m\ s^{-1}$ ۰/۰۷ و محدوده کاری ۰/۱۲۵ تا $m\ s^{-1}$ ۵۰) و یک ابزار اندازه‌گیری اختلاف فشار (مدل CPE310s- KIMO) با دقت ۰/۱ پاسکال انجام گرفت که به‌ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند. ابعاد سیکلون مورد استفاده در آزمایش‌ها در شکل ۴ و شماتیک کلی سیکلون در شکل ۵ آورده شده و اندازهٔ بخش‌های مختلف سیکلون در قالب جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۲– سرعت‌سنج هوای سیم داغ
Fig.2. Hot wire anemometer



شکل ۳– اختلاف فشارسنج
Fig.3. Differential pressure meter



شکل ٤– سیکلون مورد استفاده در آزمایش‌ها
Fig.4. Used cyclone in experiments



شکل ۵– سیکلون استرماند استفاده شده
Fig.5. Used stairmand cyclone

جدول ۱– اندازه بخش‌های مختلف سیکلون
Table 1- Values of different parts of cyclone

پارامترها Parameters	اندازه Value (cm)
قطر بدنه اصلی (D) Body diameter	55
قطر خروجی گاز (d) Gas outlet diameter	27.5
ارتفاع ورودی (A) Inlet height	27.5
عرض ورودی (B) Inlet width	11
طول محفظه خروجی گاز (R) Gas outlet duct length	27.5
ارتفاع کل (H) Total Height	220
ارتفاع بخش استوانه‌ای (h) Cylindrical section Height	82.5
قطر لولهٔ تخلیه (C) Outlet pipe diameter	15.1
طول بخش ورودی (L) Inlet length	35

توصیف مدل عددی

معادلات حاکم

قوانین حاکم بر جریان هر نوع جریان و هر نوع هندسه که در CFD در نظر گرفته شود عبارتند از: قانون بقای جرم، قانون بقای مومنتوم و قانون بقای انرژی. در حالت کلی این سه قانون یک دستگاه معادلات جفت شده‌ی غیرخطی PDE هستند که تابع‌حال برای آن‌ها حل تحلیلی پیدا نشده است. قوانین بقا برای جریان داخلی حل گردید. معادلات بقای جرم و مومنتوم در حالت کلی به‌صورت زیر بیان می‌شوند (Ansys Fluent theory guide, 2013):

معادله بقای جرم (پیوستگی)

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t}+\nabla.(\rho\vec{v})=0 \qquad (۱)$$

معادله بقای مومنتوم

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t}+\nabla.(\rho\vec{v}\vec{v})=-\nabla p+\nabla.(\bar{\tau})+\rho\vec{g} \qquad (۲)$$

p فشار استاتیک، $\rho\vec{g}$ نیروی حجمی جاذبه و $\bar{\tau}$ تانسور تنش است که از رابطه (۳) به‌دست می‌آید:

$$\bar{\tau} = \mu_{effective}\left[(\nabla\vec{v}) - \frac{2}{3}\nabla.\vec{v}I\right] \quad (۳)$$

$$\mu_{effective} = \mu + \mu_t \quad (۴)$$

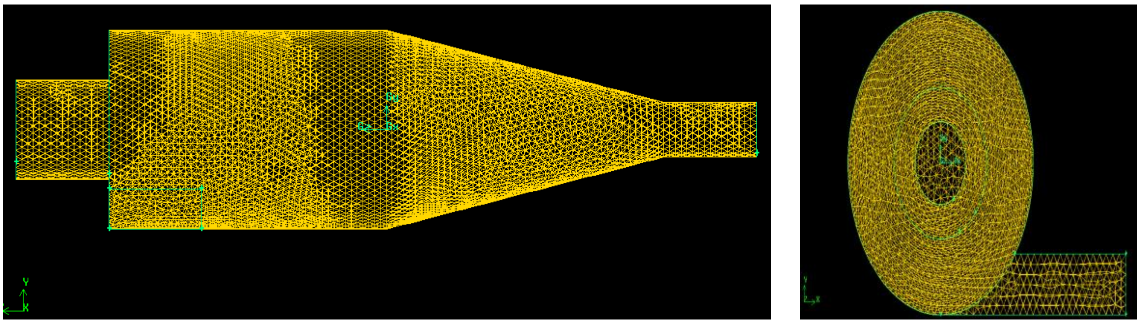
$\mu_{effective}$ ویسکوزیته مؤثر و μ_t ویسکوزیته آشفته است. به‌دلیل این‌که هیچ نوع انتقال حرارت در محاسبات وارد نشده است، لذا معادلات انرژی آورده نشده است.

گسسته‌سازی در CFD

ناحیه به‌صورت حجم محدود در یک مجموعه گسسته‌سازی می‌شود، این منطقه پس از گسسته‌سازی شبکه یا مش نامیده می‌شود. در گسسته‌سازی با کاهش مرتبه معادلات دیفرانسیل جزئی امکان حل عددی آن معادلات فراهم می‌شود که پارامتر مهمی برای انتخاب یک شبکه مطلوب و نحوه تولید شبکه مورد مطالعه است.

شبکه‌بندی دامنه محاسباتی

در ادامه، مش‌بندی سیکلون از دو دید مستقیم و بالا در شکل ۶ نشان داده شده است. برای مش‌بندی از نوع مش ترکیبی بهره برده شده است.



شکل ٦– مش‌بندی سیکلون در نرم‌افزار گمبیت

Fig.6. Meshing of cyclone in Gambit

تنظیمات حلگر

نوع حلگر در نرم‌افزار با توجه به مقدار عدد ماخ تعیین می‌شود. عدد ماخ که به‌صورت سرعت یک جسم در یک سیال به سرعت صوت در همان سیال تعریف می‌گردد، تراکم‌پذیر بودن یا تراکم‌ناپذیر بودن یک جریان را مشخص می‌کند. اگر این مقدار کمتر یا مساوی ۰/۳ باشد به معنی تراکم‌ناپذیر بودن جریان و در صورت این‌که بیشتر از ۰/۳ باشد به مفهوم تراکم‌پذیر بودن جریان است. از حلگر بر مبنای فشار در محیط‌های تراکم‌ناپذیر و از حلگر بر مبنای چگالی در محیط‌های تراکم‌پذیر استفاده می‌شود. با توجه به سرعت مواد ورودی به سیکلون و عدد ماخ پایین جریان، می‌توان از حلگر بر مبنای فشار در این مطالعه استفاده کرد. با توجه به محدوده مقادیر سرعت ورودی؛ عدد ماخ در محدوده ۰/۰۲۹ تا ۰/۰۵۸ است که تراکم‌ناپذیر بودن جریان را نشان می‌دهد.

مدل‌سازی آشفتگی

مدل انتقال تنش برشی (SST[1]) یک ورژن اصلاح شده از مدل دومعادله‌ای k-ω است. این مدل دو مدل آشفتۀ k-ω و k-ε را با هم ترکیب می‌کند. در بخش داخلی لایه مرزی مدل k-ω مورد استفاده قرار می‌گیرد و در جریان تنش آزاد به مدل k-ε تغییر می‌یابد. مدل SST از فرضیه بوسینسک برای ارتباط تنش‌های رینولدز با میانگین نرخ تغییر شکل‌ها به‌صورت زیر استفاده می‌کند. (Ansys Fluent theory guide, 2013)

$$\tau_{ij} = -\rho\overline{u_i'u_j'} = \mu\left(2S_{ij} - \frac{2}{3}\frac{\partial u_k}{\partial x_k \delta_{ij}}\right) - \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \quad (۵)$$

τ_{ij} تانسور تنش، ρ چگالی، u مؤلفه سرعت در راستای مدنظر، μ ویسکوزیته دینامیکی و S اندازه نرخ کرنش است.

فرم بقای معادلات انتقال برای هر دوی انرژی جنبشی k و نوسان آشفتگی ω به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\rho\frac{\partial(k)}{\partial t} + \rho\frac{\partial(u_j k)}{\partial x_j} = P_k - \beta^*\rho k\omega + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \sigma_k\mu_t)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \quad (۶)$$

$$\rho\frac{\partial(\omega)}{\partial t} + \rho\frac{\partial(u_j\omega)}{\partial x_j} = P_k\frac{\rho}{\mu_t} - \beta\rho\omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \sigma_\omega\mu_t)\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right] + 2(1 - F_1)\frac{\rho\sigma_{\omega 2}}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial\omega}{\partial x_j} \quad (۷)$$

σ_k و σ_ω به‌ترتیب عدد پرنتل آشفتگی برای k و ω هستند.

1- Shear Stress Transport

همچنین P_k تولید انرژی جنبشی آشفتگی با در نظر گرفتن میانگین گرادیان‌های سرعت است. P_k به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_k = \tau_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \left[\mu_t\left(2S_{ij} - \frac{2}{3}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij}\right) - \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij}\right]\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (۸)$$

μ_t ویسکوزیته آشفته بوده و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1\omega, \Omega F_2)} \quad (۹)$$

مقدار تابع F_1 در جریان آزاد (مدل k-ω) صفر و در لایه مرزی (مدل k-ε) برابر یک است. به این صورت داریم:

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (۱۰)$$

$$\arg_1 = \min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^*\omega d}, \frac{500\upsilon}{d^2\omega}\right), \frac{4\rho\sigma_{\omega2}k}{CD_{k\omega}d^2}\right] \quad (۱۱)$$

υ ویسکوزیته سینماتیکی و d فاصله تا سطح بعد است.

$$CD_{k\omega} = \max\left(2\rho\sigma_{\omega2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial\omega}{\partial x_j}, 10^{-20}\right) \quad (۱۲)$$

$CD_{k\omega}$ به‌صورت بخش مثبت عبارت متقابل انتشار تعریف می‌گردد.

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (۱۳)$$

$$\arg_2 = \max\left(2\frac{\sqrt{k}}{\beta^*\omega d}, \frac{500\upsilon}{d^2\omega}\right) \quad (۱۴)$$

k، σ_k، σ_ω، $\sigma_{\omega2}$، β_1، β_2، β^* و a_1 ضرایب انسداد هستند و مقادیر آن‌ها در مدل SST در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- ضرایب ثابت مدل SST

Table 2- Constant values of SST model

k	σ_k	σ_ω	$\sigma_{\omega2}$	β_1	β_2	β^*	a_1
0.4187	0.85	0.5	0.856	0.0785	0.0828	0.09	0.31

معادله انرژی جنبشی در مدل به‌صورت زیر تصحیح می‌گردد.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P_k f_{rot} - \beta^*\rho k\omega + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu_{ef}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \quad (۱۵)$$

و نرخ تلفات ویژه در مدل اصلی SST به‌صورت زیر تصحیح می‌گردد.

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j\omega)}{\partial x_j} = \alpha\frac{\rho P_k}{\mu_t}f_{rot} - D_\omega + Cd_\omega + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu_{ef}\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right] \quad (۱۶)$$

f_{rot}، تابش چرخش است. f_{rot} به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$f_{rot} = \max\{\min(f_{r1}, 1.25), 0.0\} \quad (۱۷)$$

شرایط مرزی

تعریف شرط مرزی از اهمیت بالایی برای حل صحیح مسئله و استخراج میدان‌های حل برخوردار است. شرایط مرزی مورد استفاده در این مطالعه، شامل شرط مرزی سرعت در ورودی و شرط مرزی فشار خروجی در دو بخش خروجی بالا و پایین است. همچنین سایر سطوح سیکلون به‌صورت دیواره تعریف شدند. نوع و مقدار شرایط مرزی در جدول ۳ آورده شده است. همچنین مشخصات فاز جامد در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۳- شرایط مرزی

Table 3- Boundary conditions

نوع شرط مرزی **Boundary Condition type**	مقدار یا حالت **Value/ Condition**
سرعت ورودی velocity inlet	12 to 20 m.s^{-1}
فشار خروجی Pressure outlet	فشار اتمسفر Atmosphere pressure
دیواره Wall	شرایط بدون لغزش No slip condition
قطر هیدرولیکی Hydraulic diameter	0.157 m
شدت آشفتگی Turbulent intensity	٪5

جدول ٤- مشخصات فاز جامد

Table 4- Solid phase properties

مشخصه **Property**	مقدار **Value**
چگالی Density	790 kg/s
قطر کمینه Minimum diameter	0.2 cm
قطر بیشینه Maximum diameter	0.8 cm
قطر متوسط Mean diameter	0.5 cm

مدل فاز گسسته[1] (DPM)

در دیدگاه لاگرانژی ذره ردیابی می‌شود و در دیدگاه اویلری از حجم کنترل برای بررسی رفتار جریان استفاده می‌گردد. مدل فاز گسسته در انسیس فلوئنت از رویکرد اویلر- لاگرانژی تبعیت می‌کند. فاز سیال با حل معادلات میانگین‌گیری شده زمانی به‌صورت پیوسته حل می‌شود، در حالی‌که فاز پراکنده با ردیابی تعداد زیادی از ذرات از طریق میدان جریان محاسبه می‌گردد. فاز پراکنده می‌تواند مومنتوم، جرم و انرژی را با فاز سیال مبادله کند.

فرض اساسی این رویکرد این است که فاز پراکنده (دوم) دارای یک کسر حجمی پایین (معمولاً کمتر از ۱۲ درصد حجمی، که درصد حجمی نسبت بین حجم کل ذرات و حجم ناحیه سیال است) باشد، حتی اگر بارگذاری جرمی بالایی مورد استفاده قرار گیرد. مسیرهای ذرات به‌صورت جداگانه در فواصل مشخص شده در محاسبه فاز سیال محاسبه می‌شوند. این باعث می‌شود که مدل برای مدل‌سازی جریان‌های ذره‌ای مناسب باشد. برای مدل‌سازی سیکلون‌های با بارگذاری شدید، تعاملات ذره با ذره و آشفتگی ذرات باید در نظر گرفته شود.

از نظر رویکرد اویلر- لاگرانژ، معادله حرکت ذره توسط رابطه (۱۸) بیان می‌شود (Ansys Fluent theory guide, 2013):

$$\frac{du_{pi}}{dt}=\frac{18\mu}{d_p^2\rho_p}C_d\,\frac{\mathrm{Re}_p}{24}(\mathrm{u}_i-\mathrm{u}_{pi})+\frac{g_i(\rho_p-\rho)}{\rho_p} \qquad (۱۸)$$

$$\frac{dx_{pi}}{dt}=u_{pi} \qquad (۱۹)$$

عبارت $F_k=\frac{18\mu}{d_p^2\rho_p}C_d\frac{\mathrm{Re}_p}{24}$ نیروی درگ بر واحد جرم ذره است. ρ_p و μ به‌ترتیب چگالی گاز و ویسکوزیته دینامیکی هستند، C_d ضریب درگ، u_i و u_{pi} به‌ترتیب سرعت گاز و ذره در راستای i هستند. g_i شتاب جاذبه در راستای i و Re_p عدد رینولدز نسبی است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathrm{Re}_p=\frac{\rho_P d_p\left|u_g-u_p\right|}{\mu} \qquad (۲۰)$$

در انسیس فلوئنت، ضریب درگ برای ذرات کروی با استفاده از همبستگی‌های اصلاح‌شده محاسبه می‌شود. معادله حرکت برای ذرات در امتداد مسیر یک ذره منفرد انتگرال‌گیری می‌شود. بازده جمع‌آوری با رهاسازی تعداد مشخصی از ذرات مجزا از ورودی سیکلون و نظارت بر تعداد خارج شده از طریق خروجی پایینی به‌دست می‌آید. برخوردهای بین ذرات و دیواره‌های سیکلون به‌صورت الاستیک کامل فرض می‌شود.

آزمون استقلال از شبکه

در شبیه‌سازی سیکلون از چهار سطح اندازه مش برای اطمینان از استقلال شبکه استفاده شد. تعداد سلول‌های مش در چهار سطح بیان‌شده تقریباً ۴۲۵۷۰۰، ۶۱۲۶۰۰، ۸۱۲۴۱۰ و ۱۱۴۶۱۰۰عدد مش بودند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که تفاوت بین افت فشار بین ورودی گاز و خروجی گرداب یاب در دو سطح مش ۶۱۲۶۰۰ عدد و ۸۱۲۴۱۰ عدد مش کمتر از ۲/۵ ٪ بود و بعد از آن افزایش تعداد مش تأثیری بر نتایج نداشت. بنابراین، برای صرفه‌جویی‌های زمانی در حل، ۶۱۲۶۰۰ عدد مش به‌عنوان مش پایه در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث

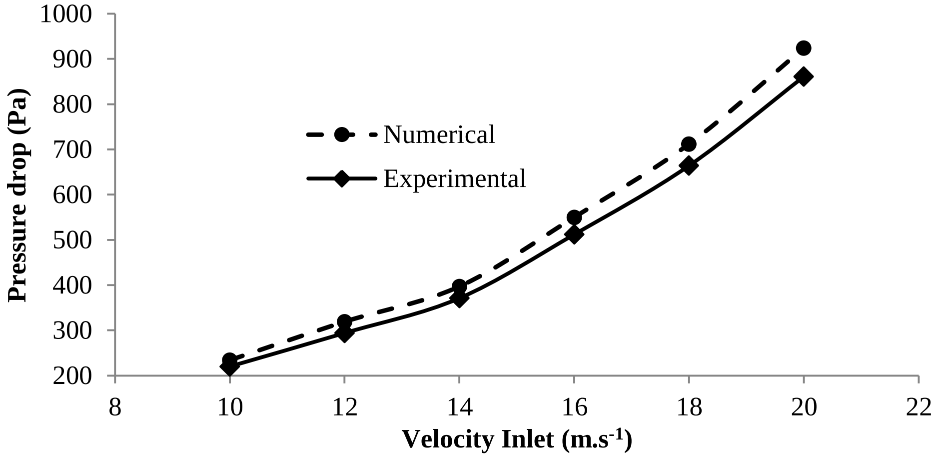
در بخش مربوط به نتایج در ابتدا به اعتبارسنجی نتایج تجربی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی پرداخته می‌شود. سپس در ادامه پارامترهای مربوط به بازده جمع‌آوری و افت فشار بحث می‌گردند و در نهایت سرعت مماسی و محوری به‌عنوان پارامترهای حائز اهمیت در سیکلون مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

اعتبارسنجی

شبیه‌سازی‌های CFD برای قابل اعتماد بودن بایستی اعتبارسنجی شوند. برای این منظور از داده‌های مربوط به افت فشار در سرعت‌های ورودی مختلف استفاده گردید. مقادیر افت فشار در

1- Discrete Phase Model

سرعت‌های ورودی مختلف از تطابق خوبی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی برخوردار بود (شکل ۷).



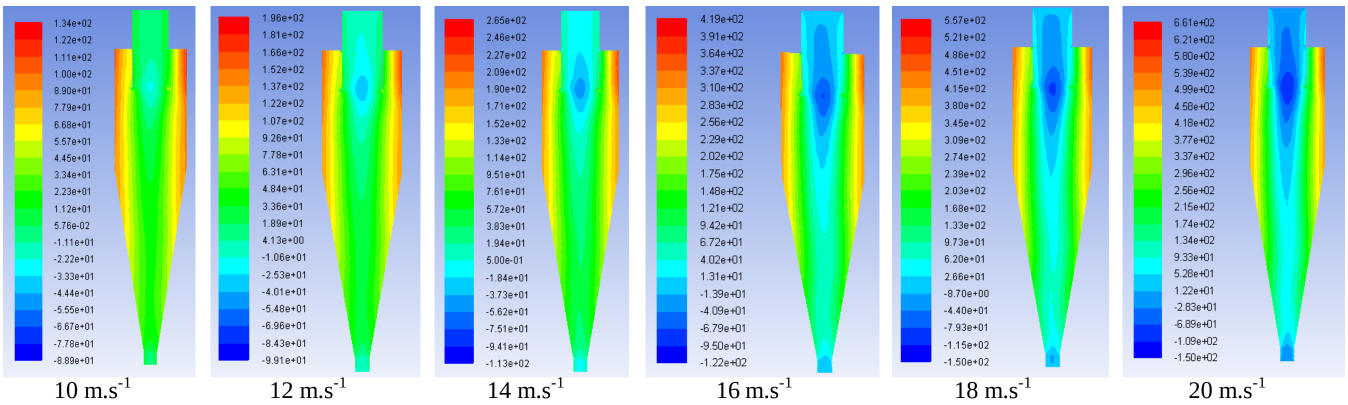
شکل ۷– اعتبارسنجی
Fig.7. Validation

فشار استاتیکی

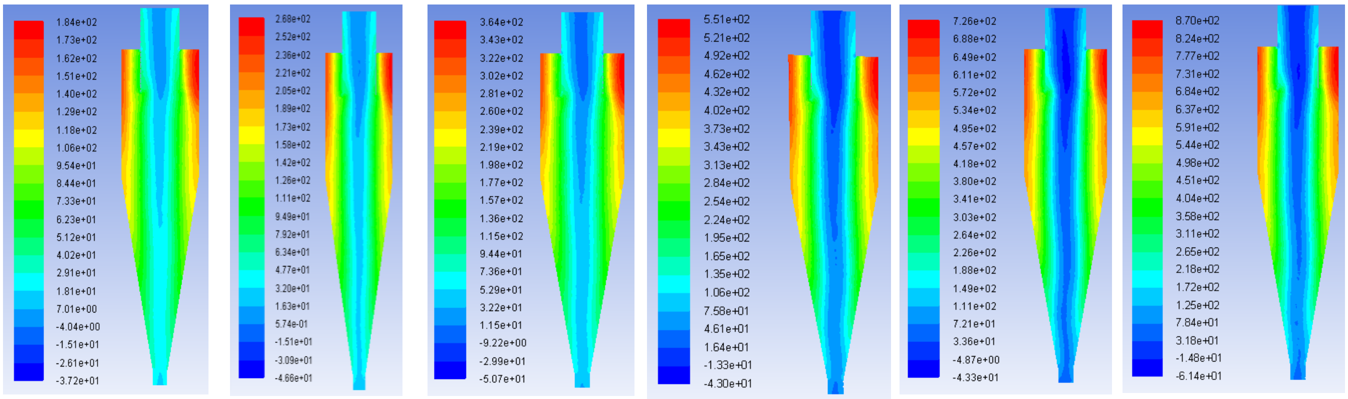
یکی از مهم‌ترین موارد در بررسی سیکلون‌ها مبحث فشار استاتیک است چرا که پدیده جداسازی اتفاق افتاده در سیکلون را کاملاً تحت تأثیر قرار می‌دهد. همان‌طوری که در شکل ۸ قابل مشاهده است، با افزایش سرعت ورودی، فشار استاتیکی در داخل مجموعه افزایش می‌یابد. برای جداسازی مؤثر در داخل سیکلون بایستی در خط واصل بین خروجی بالایی و پایینی جریان مکش برقرار گردد. با توجه به کانتورهای ارائه‌شده در سرعت‌های مختلف می‌توان کیفیت ایجاد شده فشار منفی را با جزئیات مشاهده کرد. با توجه به مطالب ارائه شده در شکل ۸، می‌توان دریافت که سرعت‌های ۱۶ $m\ s^{-1}$ و ۱۸ $m\ s^{-1}$ از پتانسیل خوبی برای استفاده به عنوان سرعت پایه سیال ورودی به سیکلون برخوردار است. سرعت $m\ s^{-1}$ ۲۰ به دلیل ایجاد افت فشار بالا به سبب داشتن فشار استاتیکی بالا، برای جداسازی مناسب نیست.

فشار کل

در کنار فشار استاتیک، فشار کل نیز به علت ماهیت خود در ارائه فشار دینامیکی طبق رابطه برنولی حائز اهمیت است. با مراجعه به شکل ۹ می‌توان مشاهده نمود که روند فشار دینامیکی مشابه روند افزایشی فشار استاتیکی به‌ازای افزایش سرعت ورودی است. با توجه به مصالحه بین بازده جمع‌آوری و افت فشار باید سرعت‌هایی را در نظر گرفت که افت فشار کمتری را به سیستم تحمیل کنند. با توجه به مسائل بیان‌شده، در این مورد نیز می‌توان سرعت‌های ورودی $m\ s^{-1}$ ۱۶ و ۱۸ $m\ s^{-1}$ را به‌عنوان سرعت‌های ورودی حائز شرایط برای استفاده بهتر در سیکلون در نظر گرفت. در نزدیکی‌های دیواره به سبب کاهش سرعت، فشار کل دارای بیشترین مقدار خود است که ناشی از افزایش فشار استاتیک و بالا رفتن عبارت مربوطه به فشار استاتیک در رابطه فشار کل در این مناطق است.



شکل ۸– کانتور فشار استاتیکی در سرعت‌های مختلف
Fig.8. Static pressure contours in various inlet velocities



شکل ۹– کانتور فشار کل در سرعت‌های مختلف

Fig.9. Total pressure contours in various inlet velocities

بازده جمع‌آوری

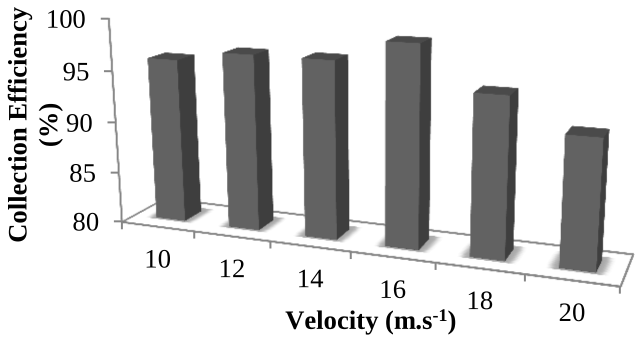
بازده جمع‌آوری در سیکلون در همه سطوح دارای مقدار ۹۲ تا ۹۹ درصد بود، بیشترین بازده جمع‌آوری برای سرعت $m\ s^{-1}$ ۱۶ (۹۹ درصد) و کمترین بازده جمع‌آوری برای سرعت $m\ s^{-1}$ ۲۰ (۹۲ درصد) حاصل شد (شکل ۱۰). در این زمینه نیز سرعت‌های $m\ s^{-1}$ ۱۶، ۱۴ و ۱۲ به‌ترتیب با بازده‌های جمع‌آوری، ۹۹، ۹۷ و ۹۷ درصد برای استفاده به‌صورت عملی نسبت به سایر سرعت‌های ورودی مناسب‌تر بودند.

کانتور مسیر حرکت ذرات و خط جریان

برای مشاهده مسر حرکت ذرات، کانتور مسیر حرکت ذرات در شکل ۱۱ و خط جریان سرعت در شکل ۱۲ ارائه شده است. ذرات بعد از داخل شدن به محفظه سیکلون از طریق بخش ورودی، در قسمت استوانه‌ای شکل حرکت کرده و سپس با توجه به نیروی گریز از مرکز ایجادشده از دو بخش خروجی بالا یا خروجی پایین از سیکلون خارج می‌شوند.

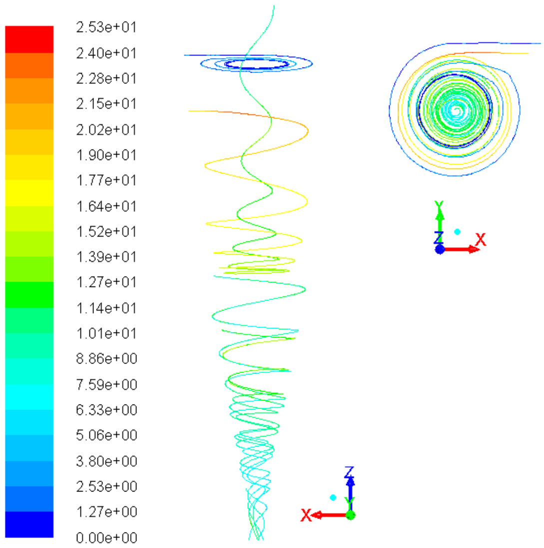
سرعت‌های محوری و مماسی

همان‌طوری که از شکل‌های ۱۳ و ۱۴ قابل مشاهده است. روند افزایشی در مورد سرعت‌های محوری و مماسی نیز اتفاق افتاده است. در زمینه سرعت محوری، حرکت جریان شامل هوای حامل و دانه‌های گندم در سه حوزه قابل تفسیر است. منطقه (۱) شامل بخش گردابه‌یاب سیکلون و کمی از بخش پایینی آن است که به سبب بالابودن سرعت خروجی سیال و قرارگیری مواد در جهت محور سیکلون این سرعت دارای مقدار بالایی است. در بخش میانی سیکلون (منطقه ۲) چون حرکت آرام‌تر می‌گردد، تا نزدیکی بخش خروجی پایین سرعت محوری دارای مقدار پایینی است. در ادامه و با توجه به قرارگیری جریان در جهت محوری، مقدار سرعت محوری دوباره افزایش می‌یابد و وارد منطقه (۳) یعنی خروجی پایین سیکلون می‌گردد. منتهی به خاطر این‌که در خلاف جهت مثبت قراردادی (رو به بالا) است، مقدار منفی به خود گرفته است (مناطق (۱)، (۲) و (۳) در شکل ۱۳ نشان داده شده است).



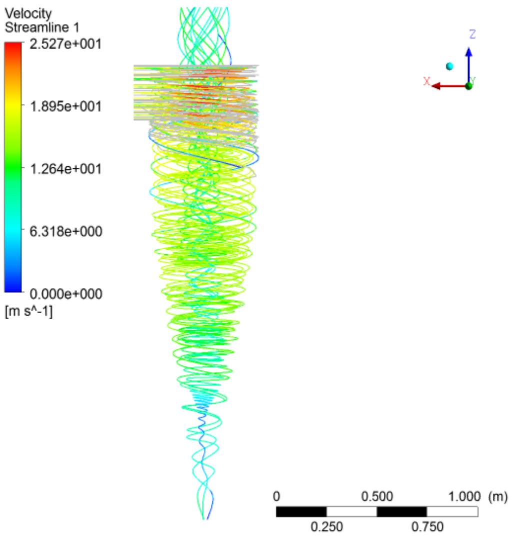
شکل ۱۰– مقایسه بازده جمع‌آوری در سرعت‌های مختلف

Fig.10. A comparison of collection efficiency in various inlet velocities



شکل ۱۱- کانتور مسیر حرکت ذرات

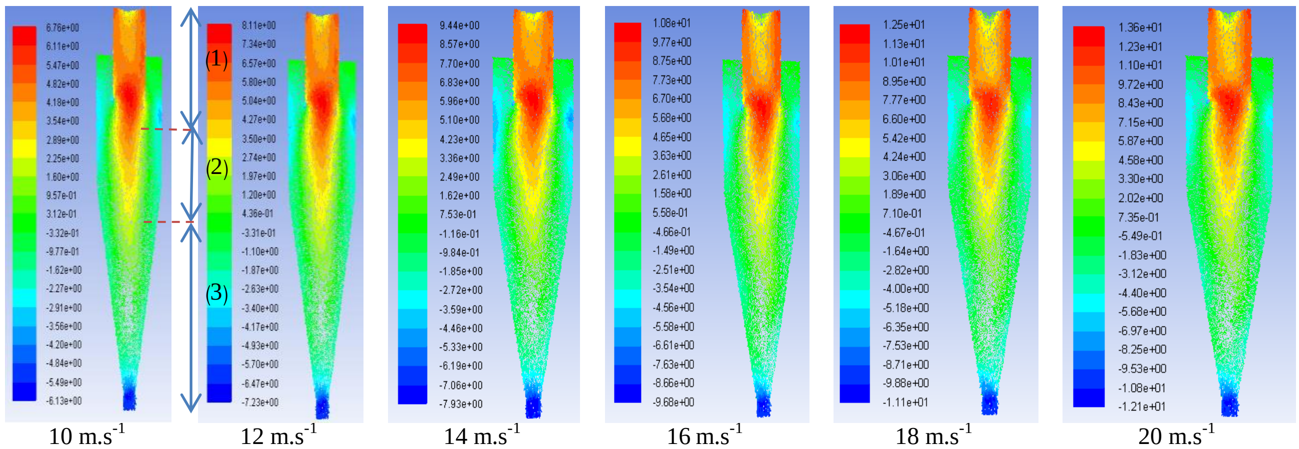
Fig. 11. Contours of particles pathline



شکل ۱۲- خط جریان سرعت

Fig. 12. Velocity streamline

در مورد سرعت مماسی، به سبب نوع ورودی جریان که به‌صورت مماسی است، همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، بیشترین مقدار سرعت مماسی در بخش ورودی اتفاق می‌افتد، در مورد سرعت مماسی هم سه حوزه شامل (۱) ورودی با بیشترین مقدار سرعت مماسی، (۲) نزدیک دیواره‌ها با مقادیر متوسط و (۳) خط مرکزی واسط بین خروجی‌ها که دارای کمترین مقدار است قابل‌ملاحظه است. در سرعت‌های بالاتر از ۱۴ $m\ s^{-1}$ حوزه جریانی (۲) دارای محدوده عملکردی بیشتری است که با رنگ نارنجی در کانتور و شاخص مورد نظر قابل مشاهده است.



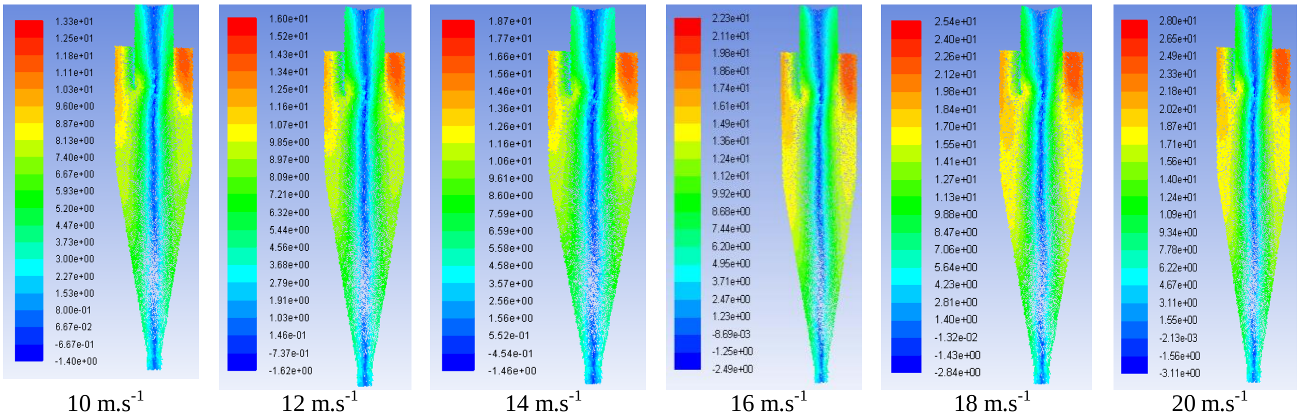
شکل ۱۳- بردارهای جهت‌دار سرعت محوری در سرعت‌های مختلف

Fig. 13. Axial velocity vector in various inlet velocities

نمودار تغییرات سرعت محوری و مماسی در ارتفاع‌های مختلف سیکلون

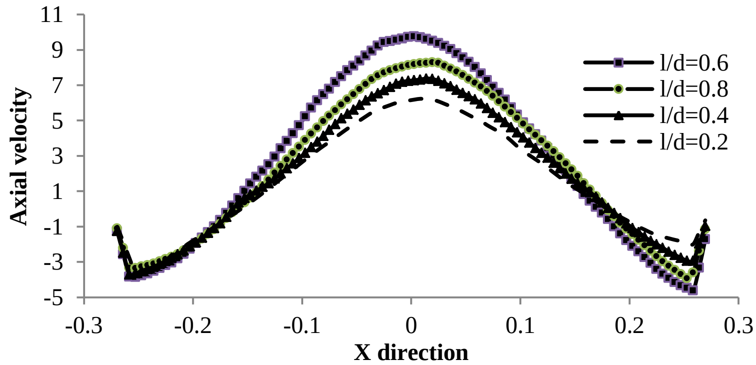
در ادامه نمودار تغییرات سرعت محوری در ۴ ارتفاع مختلف در داخل سیکلون بر اساس نسبت (l/d) آورده شده است. با توجه به روند تقریباً یکسان در سرعت‌های مختلف، این نمودارها برای سرعت ورودی ۱۸ متر بر ثانیه برای ۴ ارتفاع ارائه شده است. از بین بخش‌های مشخص شده، بیشترین مقدار سرعت محوری در نسبت ۰/۶ ارتفاع بخش استوانه‌ای نسبت به ارتفاع کل بخش استوانه‌ای اتفاق می‌افتد.

همچنین نمودار تغییرات سرعت مماسی در ۴ ارتفاع مختلف در داخل سیکلون بر اساس نسبت (l/d) در شکل ۱۶ آورده شده است.



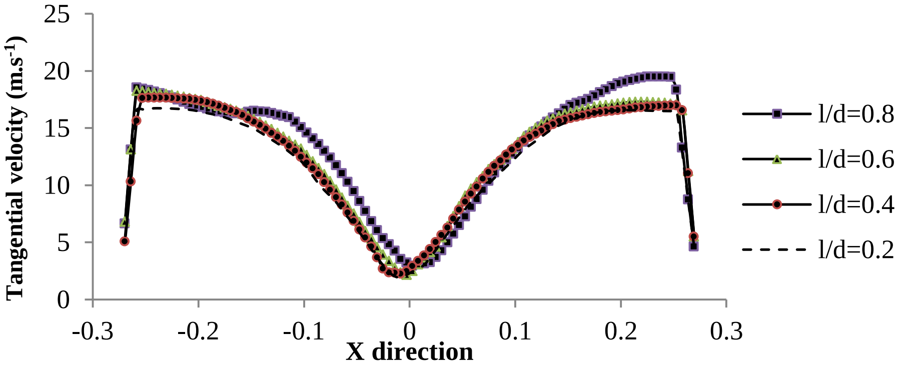
شکل ۱۴– بردارهای جهت‌دار سرعت مماسی در سرعت‌های مختلف

Fig.14. Tangential velocity vector in various inlet velocities



شکل ۱۵– نمودار تغییرات سرعت محوری در ارتفاع‌های مختلف سیکلون

Fig.15. Axial velocity variation in various cyclone heights



شکل ۱۶– نمودار تغییرات سرعت مماسی در ارتفاع‌های مختلف سیکلون

Fig.16. Tangential velocity variation in various cyclone heights

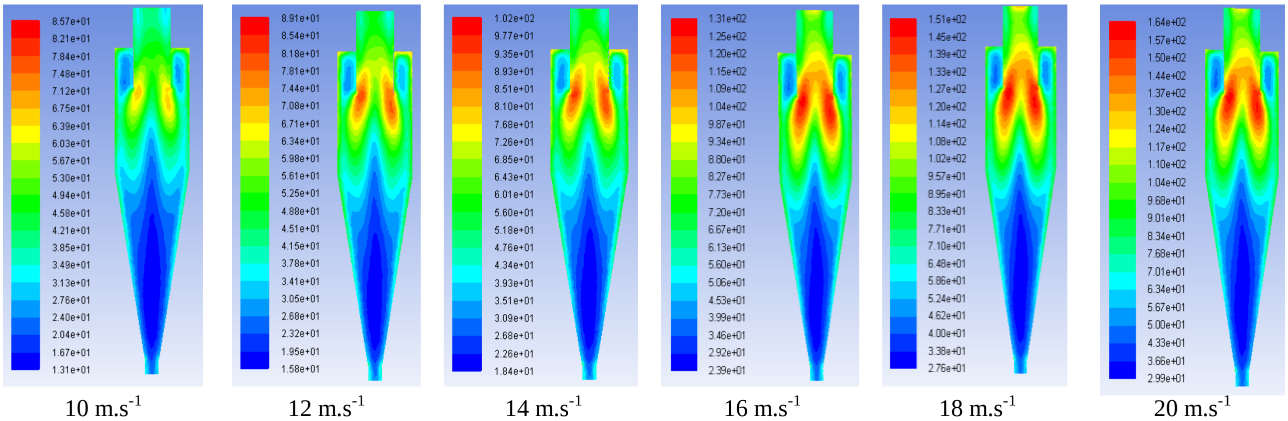
شدت آشفتگی

به‌دلیل این‌که هوا بودن سیال حامل در سیکلون‌ها در مقایسه با هیدروسیکلون‌ها که در آن‌ها از آب به‌عنوان سیال حامل استفاده می‌شود، بحث مربوط به آشفتگی اهمیت بیشتری می‌یابد. جریان‌های آشفته در سیستم ناپایداری ایجاد می‌کنند و در صورتی‌که این آشفتگی دارای مقدار بالایی باشد سیستم از حالت کارکرد طبیعی خود خارج خواهد شد. با توجه به تعریف شدت آشفتگی که نسبت انحراف معیار نوسانات سرعت به سرعت میانگین است، می‌تواند به‌عنوان معیاری برای شناسایی آشفتگی‌های داخل سیکلون استفاده شود. آشفتگی‌ها با گذر از حد مشخص می‌توانند به سیستم ارتعاش وارد کرده و سبب اخلال در کار سیکلون‌ها شوند. با توجه به شکل ۱۷، کم‌ترین شدت آشفتگی مربوط به سرعت $۱۰\ m\ s^{-1}$ است، سپس با افزایش سرعت تا $۱۴\ m\ s^{-1}$ کمی افزایش می‌یابد و دامنه بیشینه آن مقداری گسترده می‌شود. با ورود به سرعت‌های $۱۶\ m\ s^{-1}$ و بالاتر از آن علاوه بر

افزایش مقدار دامنه شدت آشفتگی نیز افزایش می‌یابد و در سرعت ۲۰ $m\ s^{-1}$ به بالاترین مقدار عددی خود می‌رسد. از شکل ۱۷ کاملاً مشخص است که نوسانات سرعت در گردابه‌یاب به سبب تغییرات سرعت در این منطقه مقدار بسیار بالایی دارد و در بخش مخروطی سیکلون نوسانات سرعت پایین قابل مشاهده است. همچنین در ورودی سیکلون به‌دلیل این‌که سرعت به‌صورت نسبتاً یکنواختی وارد می‌شود و هنوز تغییرات اتفاق نیفتاده مقدار شدت آشفتگی دارای مقدار پایین است. با در نظر گرفتن شرایط کاری، سرعت‌های ۱۰ $m\ s^{-1}$ تا ۱۶ $m\ s^{-1}$ از نقطه نظر شدت آشفتگی سرعت‌های ورودی مناسبی می‌باشند.

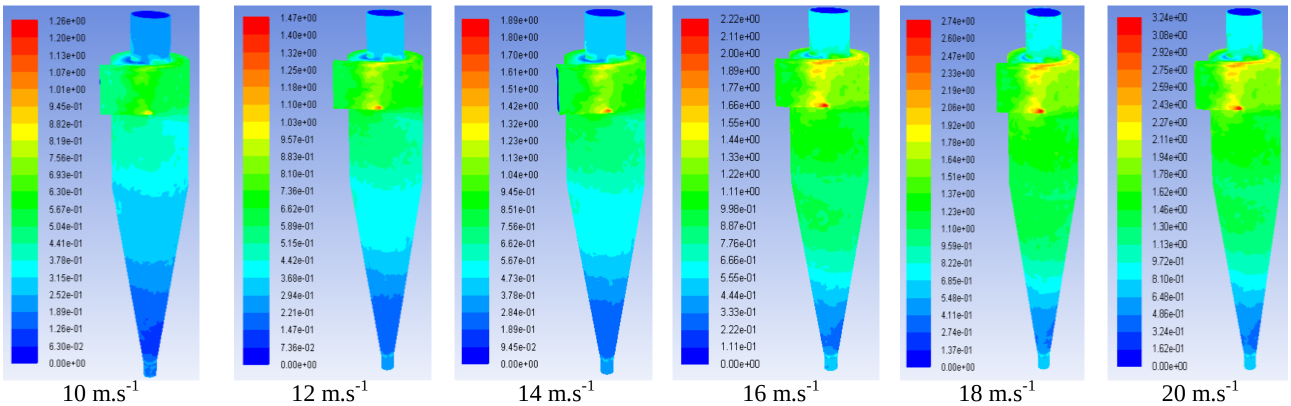
سایش

همیشه در مواردی که تماس دو جریان حادث گردد، سایش به سبب وجود اصطکاک امری غیرقابل‌اجتناب خواهد بود. یکی از مشکلات رایج در صنایع استفاده‌کننده از سیکلون مانند صنایع آرد، سیمان و پتروشیمی سایش و خوردگی ایجاد شده در مقاطع سیکلون می‌باشد. با شناسایی محل‌های ایجاد سایش می‌توان با اتخاذ تکنیک‌های لازم از قبیل مقاوم ساختن بخش‌های مربوطه از استفاده از آلیاژهای مقاوم در برابر سایش و خوردگی، هزینه تعویض و نگهداری و تعمیرات سیکلون‌ها را به شدت کاهش داد و از وقفه ایجاد شده در محل کار به‌واسطه خرابی تجهیزات جلوگیری کرد. در مورد سایش اتفاق افتاده در دیواره سیکلون مورد مطالعه به سبب ورود مماسی مواد و برخورد مستقیم مواد با دیواره در محل ورودی بیشترین خوردگی در بخش ورودی و صفحه بالایی بخش استوانه‌ای اتفاق می‌افتد (شکل ۱۸). سپس در ادامه به دنبال جهت‌گیری مواد به سمت مرکز در زیر گردابه‌یاب و کاهش برخورد جریان با دیواره‌ها از مقدار آن کاسته خواهد شد. شکل ۱۸ روند افزایشی مقدار سایش را با توجه به افزایش سرعت ورودی نشان می‌دهد. با گذر از سرعت ۱۰ $m\ s^{-1}$ به ۱۲ $m\ s^{-1}$ سایش به‌صورت نسبتاً محسوسی تا سرعت ۱۶ $m\ s^{-1}$ افزایش می‌یابد. سپس با افزایش سرعت به ۱۶ $m\ s^{-1}$ محدوده سایشی در ورودی افزایش می‌یابد. می‌توان نتیجه گرفت که از نقطه‌نظر سایش سرعت ۱۰ تا ۱۶ $m\ s^{-1}$ (خود سرعت ۱۶ $m\ s^{-1}$ با توجه به مقدار پایین‌تر علی‌رغم دامنه سایشی بالاتر) می‌تواند در کاربرد عملی مورد استفاده قرار بگیرد. استفاده از سرعت‌های $m\ s^{-1}$ ۱۸ و ۲۰ $m\ s^{-1}$ مستلزم مقاوم‌سازی بخش‌های مربوطه خواهد بود.



شکل ۱۷– کانتور شدت آشفتگی در سرعت‌های مختلف

Fig.17. Turbulence intensity contour in various velocities



شکل ۱۸– کانتور سایش در سرعت‌های مختلف

Fig.18. Erosion contour in various velocities

نتیجه‌گیری

شش سطح سرعت ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ m s^{-1} برای درک هرچه بیشتر تأثیر سرعت ورودی بر عملکرد سیکلون به‌عنوان سطوح تست انتخاب شدند. تست‌های تجربی برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی توسط یک سرعت‌سنج هوای سیم داغ (مدل TSI -8465 با رزولوشن ۰/۰۷ m s^{-1} و محدوده کاری ۰/۱۲۵ تا ۵۰ m s^{-1}) و همچنین یک ابزار اندازه‌گیری اختلاف فشار (مدل CPE310s- KIMO) با دقت ۰/۱ پاسکال انجام گرفت. سپس با تبیین معادلات حاکم، تنظیمات حلگر (بر پایه فشار)، گسسته‌سازی و انتخاب مدل آشفتگی مناسب و با بهره‌گیری از مدل فاز مجزا با تعریف شرایط مرزی مناسب مدل آشفتگی حل گردید. مقادیر فشار استاتیکی و کل، بازده جمع‌آوری، سرعت‌های محوری و مماسی و در انتها شدت آشفتگی و سایش به‌عنوان پارامترهای مهم در عملکرد سیکلون‌ها مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج به‌صورت زیر ارائه می‌گردد:

(۱): از نقطه نظر فشار سرعت‌های ۱۶ m s^{-1} و ۱۸ m s^{-1} از پتانسیل خوبی برای استفاده به‌عنوان سرعت پایه ورودی به سیکلون برخوردار است. سرعت ۲۰ m s^{-1} به‌دلیل ایجاد افت فشار بالا به سبب داشتن فشار استاتیکی بالا، برای جداسازی مناسب نیست.

(۲): بیشترین بازده جمع‌آوری برای سرعت ۱۶ m s^{-1} (۹۹ درصد) و کمترین بازده جمع‌آوری برای سرعت ۲۰ m s^{-1} (۹۲ درصد) حاصل شد.

(۳): سرعت‌های محوری و مماسی هر کدام در سه حوزه بررسی شدند که برای سرعت محوری منطقه (۱) شامل بخش گردابه‌یاب سیکلون بود که به سبب بالا بودن سرعت خروجی سیال و قرارگیری مواد در جهت محور سیکلون این سرعت دارای مقدار بالایی است. بخش میانی سیکلون منطقه (۲) بود و خروجی پایین سیکلون، منطقه (۳) را شامل می‌شد. برای سرعت مماسی نیز تحلیل مشابهی ارائه گردید.

(۴): شدت آشفتگی به‌عنوان معیاری برای شناسایی آشفتگی‌های داخل سیکلون در تمامی سطوح سرعت استخراج گردید و نتیجه گرفته شد که سرعت‌های ۱۰ m s^{-1} تا ۱۶ m s^{-1} سرعت‌های ورودی مناسبی از نقطه نظر شدت آشفتگی می‌باشند.

(۵): نتیجه گرفته شد که از نقطه‌نظر، سایش سرعت ۱۰ m s^{-1} تا ۱۶ m s^{-1} قابلیت استفاده در کاربرد گسترده را دارد و سرعت‌های ۱۸ m s^{-1} و ۲۰ m s^{-1} نیازمند مقاوم‌سازی بخش‌های مربوطه برای جلوگیری از سایش می‌باشند.

References

1. Hoffmann, A. C., M. De Groot, W. Peng, H. W. A. Dries, and J. Kater. 2001. Advantages and risks in increasing cyclone separator length, American Institute of Chemical Engineers Journal 47: 2452-2460.
2. Alahmadi, Y. H., A. F. Nowakowski. 2016. Modified shear stress transport model with curvature correction for the prediction of swirling flow in a cyclone separator, Chemical Engineering Science 147: 150-165.
3. Alexander, R. M. 1949. Fundamentals of cyclone design and operation, Australasian Institute of Mining and Metallurgy 152: 152-153.
4. Elsayed, K., and C. Lacor. 2010. Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations. Chemical Engineering Science 65: 6048-6058.
5. Gimbun, J., T. G. Chuah, A. Fakhru'l-Razi, and T. S. Y. Choong. 2005b. The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: a CFD study.Chemical Engineering and Processing 44: 7-12.
6. Gimbun, J., T. G. Chuah, T. S. Y. Choong, and A. Fakhru'l-Razi. 2005a. A CFD study on the prediction of cyclone collection efficiency. International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics 6: 161-168.
7. Gimbun, J., T. G. Chuah, T. S. Y. Choong, and A. Fakhru'l-Razi. 2005c. Prediction of the effects of cone tip diameter on the cyclone performance, Journal of Aerosol Science 1056-1065.
8. Griffiths, W. D., and F. Boysan. 1996. Computational fluid dynamics (CFD) and empirical modelling of the performance of a number of cyclone samplers. Journal of Aerosol Science 27: 281- 304.
9. Hoekstra, A. J., J. J. Derksen, and H. E. A. Van Den Akker. 1999. An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones, Chemical Engineering Science 54: 2055-2065.
10. Inc. ANSYS. 2013. ANSYS FLUENT Theory Guide. Release 182 15317: 373-464.
11. Naddi, F., S. A, Mehdizadeh, U. N. Zonuz. 2017. Comparing between predicted output temperature of flat-plate solar collector and experimental results: computational fluid dynamics and artificial neural network: Journal of Agricultural Machinery 7 (1): 298-311. (In Farsi).
12. Rezvanivandefanayi, A., and A. M. Nikbakht. 2015. A CFD Study of the Effects of Feed Diameter on the Pressure Drop in Acyclone Separator: International Journal of Food Engineering 11: 71-77.
13. Rezvanivandefanayi, A., A. Hasanpour, and A. M. Nikbakht. 2019. Study of the vapor thermos-compressor to reduce energy consumption in the sugar production line using Computational Fluid Dynamics: Journal of Agricultural Machinery 10 (2). (In Farsi).
14. Rezvanivandefanayi, A., A. M. Nikbakht, and A. Modarres Motlagh. 2013a. Modeling of material conveying in cyclone separators using Computational fluid Dynamics: The 6th Agricultural Research Findings Conference. University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

15. Rezvanivandefanayi, A., A. M. Nikbakht, and A. Modarres Motlagh. 2013b. Investigating the effect of mass flow rate on velocity fields of cyclone separators using computational fluid dynamics: The second national congress of organic and conventional agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
16. Rezvanivandefanayi, A., A. M. Nikbakht, and A. Modarres Motlagh. 2013c. Investigating the effect of mass flow rate on the friction of the wall of cyclone separators using computational fluid dynamics: The second national congress of organic and conventional agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
17. Rezvanivandefanayi, A., A. M. Nikbakht, and A. Modarres Motlagh. 2013d. Investigating the effect of mass flow rate on Pressure drop of cyclone separators using computational fluid dynamics: The second national congress of organic and conventional agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
18. Zhao, B., Y. Su, and J. Zhang. 2006. Simulation of gas flow pattern and separation efficiency in cyclone with conventional single and spiral double inlet configuration. Chemical Engineering Research and Design 84: 1158-1165.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 11, No. 2, Fall- Winter 2021, p. 231-246

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۱، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۴۰۰، ص ۲۴۶-۲۳۱

Numerical Study of Wheat Conveying in Separator Cyclone using Computational Fluid Dynamics

S. Naiemi Dizajyekan[1], Gh. Shahgholi[2*], A. Rezvanivand fanaei[3], V. Rostampour[4]

Received: 09-03-2019
Accepted: 14-07-2019

Introduction

Cyclones are widely used to separate solid particles from the fluid phase. Due to the ease of construction, low running costs, and hard-working conditions at high temperatures, people's interest in using cyclones is increasing day by day. Engineers are generally interested in two parameters to perform a complete evaluation of the design and operation of a cyclone. These parameters are the particle collecting efficiency and the pressure drop inside the cyclone. The precise prediction of the pressure drop in cyclone is very important which it is directly related to operating costs.

Computational Fluid Dynamics (CFD) is a diversified tool for predicting flow behavior in a wide range of design and operational conditions. Numerical solution of Navier-Stokes equations is the basis of all CFD techniques, which is the result of fast computer upgrades and a better understanding of the numerical resolution of turbulence.

Materials and Methods

Regarding preliminary experimental tests and understanding the fluid flow, the flow rate of 0.08 kg s^{-1} was selected as the flow rate. Six levels of inlet velocities 10, 12, 14, 16, 18, and 20 m s^{-1} were selected for understanding the effect of inlet velocity on the cyclone performance. The measurements were carried out using a hot-air anemometer (TSI-8484model with a resolution of 0.07 m s^{-1} and an operating range of 0.125 to 50 m s^{-1}), and a pressure differential meter instrument (CPE310s-KIMO model) with an accuracy of 0.1 Pa.

The region is discretized as a finite volume in a set, called the region grid or mesh after discretization. For incompressible fluids, pressure-based and density-based solvers are used, respectively. Regarding the velocity of the material entering the cyclone and low Mach number, a pressure-based solver could be used in this study.

The shear stress transport model (SST) is a modified version of the k-ω 2-equation model. This model combines the two turbulence k-ω and k-ε models. The Lagrangian discrete phase model in Ansys Fluent follows to the Euler-Lagrangian model.

Defining the best type of boundary condition is important for solving the problem and extracting solving fields. The boundary conditions used in this study include the inlet velocity in the entrance of cyclone and output pressure in both the upper and lower output sections.

Results and Discussion

In the results section, the results are initially validated by experimental results. Then, the parameters relating to separation efficiency and pressure drop are discussed. Finally, the tangential and axial velocities are considered as important parameters in the cyclone performance.

One of the important issues in the cyclones is the static pressure because it completely affects the phenomenon of separation in the cyclone. The velocities of 16 m s^{-1} and 18 m s^{-1} have a good potential for use as the base velocity of the inlet fluid to the cyclone. The velocity of 20 m s^{-1} is not suitable for separation due to high-pressure drop related to high static pressure.

The separation efficiency in the cyclone was 92 to 99% at all levels, the highest separation efficiency of 99% occurred at the velocity of 16 m s^{-1} and the lowest separation efficiency of 9% happened at the velocity of 20 m s^{-1}.

An increasing trend in axial and radial velocities occurred and the highest tangential velocity occurring in the input section. Considering the working conditions, the inlet velocities of 10 m s^{-1} to 16 m s^{-1} are appropriate for the turbulence intensity viewpoint.

Conclusions

(1): The speeds 16 m s^{-1} and 18 m s^{-1} showed a good potential for use as a base velocity of the fluid to the cyclone.

1- PhD. student, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Associate Professor, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

3- Assistant Professor, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

4- Assistant Professor, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

(*- Corresponding Author Email: gshahgoli@yahoo.com)

(2): The highest separation efficiency for the velocity of 16 m s^{-1} (99%) and lower isolation efficiency was obtained at velocity of 20 m s^{-1} (92%).
(3): The velocities of 10 m s^{-1} to 16 m s^{-1} are suitable input rates from the point of view of turbulence intensity.
(4): It is concluded that from the point of view of wear to the velocity of 10 to 16 m s^{-1}, practical use is possible, and the velocity of 18 m s^{-1} and 20 m s^{-1} require the reinforcement of the relevant sections.

Keywords: Computational fluid dynamics, Cyclone, Pressure drop, Stairmand